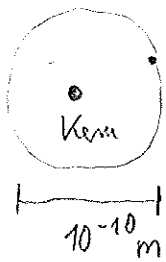


# I. Kern- und Teilchenphysik

1-1

## 1. Einführung

### 1.1 Struktur der Materie - Überblick



Atom

Elektron:  $< 10^{-18} \text{ m}$

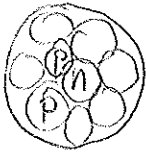
(strukturlos bis  $10^{-18} \text{ m}$ )

= plattformartig

$$m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$$

typ. Anregungsenergie

eV ... keV



Atomkern

MeV

$${}^A_Z X_N$$

Kernladungszahl  $Z$

Neutronenzahl  $N$

Massenzahl  $A = N + Z$



Nucleon = Proton od. Neutron

$> 200 \text{ MeV}$

$$m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2$$

Strukturlose Teilchen:  
nicht anregbar !!

• u, d

Quarks (Valenz):  $< 10^{-18} \text{ m}$   
(strukturlos)

Kernradien:

$$R_K^3 = V \sim A$$
$$\Rightarrow R_K = 1,22 \cdot 10^{-15} \text{ m } A^{1/3}$$
$$= 1,22 \text{ fm } A^{1/3}$$

Atom- und Kernmassen:

Atommassen in [u]:  $1 \text{ u} = \frac{1}{12} [{}^{12}_6\text{C} - \text{Atom}]$  } Bindungsenergie +  $e^-$

Proton + Neutron massen:  $\text{MeV}/c^2$

$$m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2 = 1,00728 \text{ u}$$

$$m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2 = 1,00867 \text{ u}$$

$$m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$$

## 1.2 Fundamentale Bausteine

2 Klassen "permutförmiger" (nach heutiger Erkenntnis) Spin  $\frac{1}{2}$  Teilchen:  
Fermionen:

Leptonen	I	II	III
$Q = 0$	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	$m_\nu < 2 \text{ eV}/c^2$		
$Q = -1$	$e^-$ $511 \text{ keV}/c^2$	$\mu^-$ $106 \text{ MeV}/c^2$	$\tau^-$ $1.78 \text{ GeV}/c^2$
Quarks			
$Q = +\frac{2}{3}$	$u$ $\sim 3 \text{ MeV}/c^2$	$c$ $1.3 \text{ GeV}/c^2$	$t$ $\sim 172 \text{ GeV}/c^2$
$Q = -\frac{1}{3}$	$d$ $\sim 6 \text{ MeV}/c^2$	$s$ $104 \text{ MeV}/c^2$	$b$ $4.2 \text{ GeV}/c^2$

Quarks sind gelad.  
Leptonen der 1. Familie stabil!

Für Quarks existiert neben der elektrischen Ladung die sogenannte Farbladung, die Ladung der starken WW. Sie kann 3 verschiedene Werte annehmen:  $r, g, b$

Quarks existieren nicht frei sondern nur in Hadronen gebunden.

Zu allen fundamentalen Teilchen existieren Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung (Farbladung).

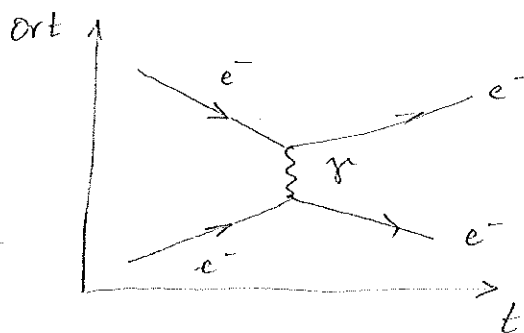
$$\begin{aligned} e^- &\rightarrow e^+ \\ \nu &\rightarrow \bar{\nu} \\ u &\rightarrow \bar{u} \\ d &\rightarrow \bar{d} \end{aligned}$$

Die uns umgebende Materie ist nur aus Teilchen der 1. Generation aufgebaut. Teilchen der II und III. Generation "zerfallen" (Schwache WW).

### 1.3 Fundamentale Wechselwirkungen

In Quantenfeldtheorie behandelt man Kräfte als quantisierte Felder. Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen werden durch Austausch dieser Feldquanten übertragen. (Austauschbosonen)

Bsp.: Beschreibung der e.m. Streuung zweier Elektronen:



"Feynman-Diagramme":  
Austausch eines Photons

WW	relative Stärke	Austauschboson	Spin	Masse	Reichweite
stark	1	8 Gluonen	1	0	$< 1 \text{ fm}$
e.m.	$\sim 10^{-2}$	Photon	1	0	$\infty$
Schwache	$\sim 10^{-7}$	$W^\pm, Z$	1	80, 91 GeV/c	$\sim 10^{-3} \text{ fm}$
Gravitation	$\sim 10^{-39}$	Graviton	2	0	$\infty$

Bem zur Gravitation:

//° Spielt auf großen Skalen eine wichtige Rolle, kann aber bei Behandlung von Elementarteilchen vernachlässigt werden (zunächst im Rahmen der Vorlesung).

° Zudem ist es bis heute nicht gelungen die Gravitation im Rahmen einer QFT konsistent zu behandeln.

(Problem: nicht lineare Effekte; attraktivs Potential zw. 2 Massen  
→ Beschleunigung →  $m = m_0 \gamma$  erhöht Gravitation)

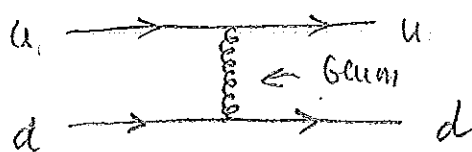
# WW zwischen fundamentalen Teilchen

	Starke	e.m.	Schwache WW
$\nu$	0	0	+
$e^-$	0	+	+
u-typ Q	+	+	+
d-typ Q	+	+	+

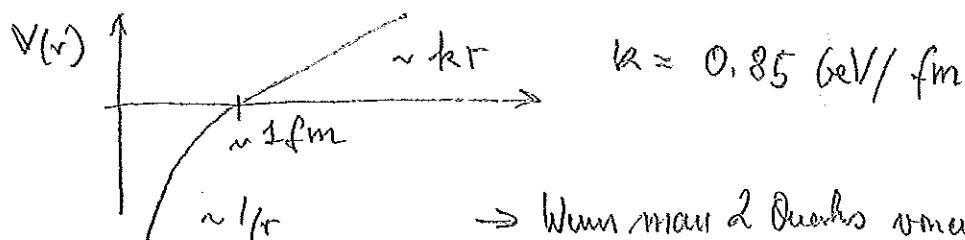
a.) e.m. WW: wirkt zwischen allen geladenen Teilchen  
"fast alle Kräfte des täglichen Lebens"

b.) Starke WW:

Wirkt zwischen Quarks da diese Farbladung tragen:



Potential zwischen zwei Quarks



→ Wenn man 2 Quarks voneinander entfernt wirken sehr große Kräfte

→ Quarks sind in fundamentalen Hadronen eingeschlossen: Confinement

2 Typen:

(1) 3-Quark-Systeme = Baryonen:  $r + g + b = \text{neutral}$

$$p = |uud\rangle \quad n = |udd\rangle \quad \Lambda^+ = |uus\rangle$$

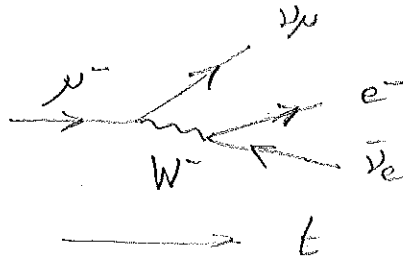
(2) Quark-Antiquark-Systeme = Mesonen:  $r + \bar{r} = \text{neutral}$

$$\pi^+ = |ud\rangle \quad \pi^- = |\bar{u}d\rangle \quad \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (|d\bar{d}\rangle - |\bar{u}u\rangle)$$

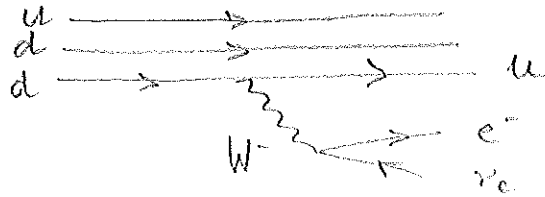
|| Bem.: Isospin Triplett mit  $I_3 = 0$   
||  $\Rightarrow$  Spin 0  $I = 1$

c.) Schwache WW : „ $\beta$ “- Zerfall

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$



$$n \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}_e$$



1.4 Erhaltungsgrößen

- Energie, Impuls und Drehimpulserhaltung
- Ladungserhaltung
- Leptonzahl-Erhaltung

$L_e, L_\mu, L_\tau$  - Leptonzahl:

	$e^-$	$e^+$	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$
$L_e$	1	-1	1	-1

(s.  $\beta$ -Zerfall des Myons)

Gilt auch an jedem Vertex des Feynmandiagramms!

Zerfall:  $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$  verboten!

- Baryonenzahlerhaltung:

Bsp:  $p^+ \rightarrow e^+ \pi^0$  Verboten

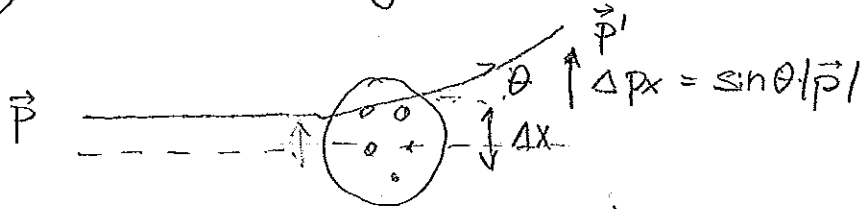
$B=1$                        $B=0$

Es gibt noch eine Reihe weiterer Quantenzahlen die allerdings nicht mehr in allen WW erhalten sind (s. a. Kap. 3)

## 1.5 Strukturuntersuchung durch Streuexperimente

(\*) s. u.

a) elastische Streuung eines Probenkerns:  $a + A \rightarrow a + A$



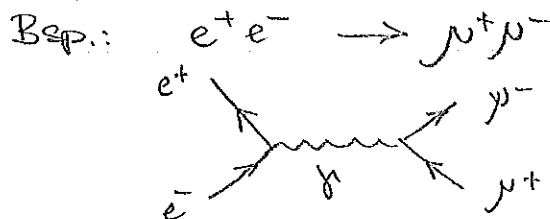
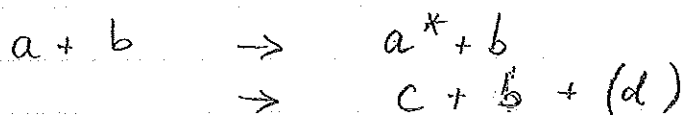
Um Strukturen aufzulösen muß die DeBroglie Wellenlänge des Probe  $\lambda = \frac{h}{p}$  in die Größenordnung der Struktur sein. Aus Optik:  $\lambda < \Delta x$  mit  $\lambda = \frac{h}{p}$

Auflösungsvermögen:  $\Delta x \approx \frac{h}{\Delta p_x}$

P	$\Delta x$ ( $\theta = 45^\circ$ )
1 GeV/c	$0,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
100 GeV/c	$3 \cdot 10^{-18} \text{ m}$
200 GeV	$1,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}$

← heutige experimentelle Auflösungsvermögen.

b.) inelastische Streuexperimente:



(\*)

Streuexperimente liefern mit Reaktionsraten, Energie und Winkelverteilungen der Reaktionsprodukte Informationen über die Dynamik des Wechselwirkungs und damit auch über den Aufbau der Teilchen.

1.6 Einheiten system

SI Einheiten in Teilchenphysik nicht praktisch:

Typ. Längenskalen:  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$   
 typ. Brundenergie in Kina: MeV  
 typ. Teilchenmassen:  $100 \text{ MeV}/c^2 \dots \dots \mathcal{O}(100 \text{ GeV}/c^2)$

Viele Lehrbücher und vielleicht auch die Übersetzungsprogramme benutzen natürliche Einheiten und setzen  $\hbar = 1$   $c = 1$ ,  
 Macht Formeln übersichtlicher.

$$\begin{array}{l} [\text{Energie}] = \frac{1}{[\text{Zeit}]} = \frac{1}{[\text{Länge}]} = \text{GeV} \\ [\text{Masse}] \\ [\hbar] \end{array}$$

Wichtige Umrechnungskonstante:  $\text{MeV}/\text{GeV} \leftrightarrow \text{Länge}/\text{Zeit}$

$$\begin{array}{l} \hbar c = 197 \text{ MeV fm} \\ (\hbar c)^2 = 0,389 \text{ GeV}^2 \text{ mb} \end{array} \quad \text{mit } 1 \text{ b} = 1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

Bsp:  $\Delta x \cdot \Delta p_x \lesssim \hbar$

$$\rightarrow \Delta x \approx \frac{197 \text{ MeV}}{\Delta p_x [\text{MeV}/c]} \text{ fm}$$